

# Diagnostyka stanu technicznego i badania nieniszczące dla energetyki

Zbigniew Hilary Żurek, Gerd Dobmann, Bernd Rockstroh, Dominik Kukla

## Wprowadzenie

Metodami najdokładniej charakteryzującymi procesy degradacyjne w stali są metody neutronowe i rentgenowskie [1]. Metody magneto-indukcyjne są także czułe na zmiany parametrów elektrycznych i magnetycznych, zajmując kolejne miejsca. Metody magneto-indukcyjne stosowane były głównie do wykrywania pęknięć. Obecnie metody te wprowadzane są do detekcji procesów zmęczenia eksploatacyjnego [3, 4, 6, 7].

Szczegółowe porównanie parametrów początkowych (wejściowych) materiału z parametrami materiału eksploatowanego w okresie kilkunastu lub kilkudziesięciu lat w wielu przypadkach jest wręcz niemożliwe. Takie porównanie jest niezbędne dla oceny stanu technicznego maszyn i instalacji energetycznych wykonanych ze stali stopowych.

## Materiał badań

Stal chromowo-molibdenowa 15HM (PN-75/H-84024, 13CrMo4-5, EN) jest stalą nierdzewną, przeznaczoną do pracy w podwyższonych temperaturach [2]. Stal ta charakteryzuje się dobrą plastycznością zarówno w wysokich, jak i niskich temperaturach. Jest dobrze obrabialna, stosowana w przemyśle chemicznym i energetyce, w temperaturach podwyższonych do 500°C. Ma zastosowanie m.in. na rury i przewody przegrzewaczy, zbiorniki ciśnieniowe oraz walczaki.

Gatunek stali	Standard	Skład chemiczny			
		C	Mn	Si	P
15HM	PN	0,11 0,18	0,40 0,70	0,15 0,35	max 0,040

Skład chemiczny – ciąg dalszy					
S	Cu	Cr	Ni	Mo	inne
max 0,040	max 0,25	0,70 1,00	max 0,35	0,40 0,55	Al max 0,02

Stal stopowa konstrukcyjna chromowo-molibdenowo-wanadowa 13HMF PN-75/H-84024 [2] (lub jej odpowiednik 14MoV6-3, 1.7715) była stosowana w produkcji rur kotłowych, części turbin parowych oraz kotłów pracujących w temperaturach do 560°C.

Gatunek stali	Standard	Skład chemiczny			
		C	Mn	Si	P
13HMF	PN	0,10 0,18	0,40 0,70	0,15 0,35	max 0,040

**Streszczenie:** Stal martenzytyczna P91 należy do grupy stali stosowanych w energetyce. Komponenty maszyn i wyposażenie wykorzystujące stale z tej grupy (K18 - P 265 i 13 HMF) są użytkowane w eksploatacji przy podwyższonych temperaturach. Stale te są narażone na obciążenia zmęczeniowe cieplne, przyspieszoną korozję, pełzanie dynamiczne i relaksację powodowane procesami zmęczeniowymi. Trudne warunki eksploatacji (temperatura, ciśnienie) wywierają różny wpływ na proces zmian ich parametrów fizycznych. W przypadku większości stali stosowanych w energetyce magneto-indukcyjny pomiar właściwości fizycznych jest dogodną techniką badania próbek, a nawet przy ciągłym diagnozowaniu wycinka instalacji (SHM). Artykuł prezentuje wyniki badań przeprowadzonych dla próbek stalowych P91, P265 i 13 HMF oraz proponuje niskokosztowe rozwiązanie badań nieniszczących (NDT) i monitoringu eksploatacyjnego.

Słowa kluczowe: SHM monitoring strukturalny, NDT badania nieniszczące

## SHM, NDT DUE FOR POWER ENGINEERING

**Abstract:** The martensitic steel P91 belongs to the group of steels used in power engineering. Machine components and equipment using steels from the group (K18 - P 265 and 13 HMF) are utilized in service at increased temperatures. Such steels are exposed to thermal fatigue loads, accelerated corrosion, dynamic creep and relaxation due to fatigue processes. The harsh operation conditions (temperature, pressure) have a diverse influence on the evolution process of their physical parameters. In case of most of the steels used in power industry the magneto-inductive measurement of physical properties is a convenient technique for testing of samples, even for continuous diagnostics of installation sector (SHM). The paper presents results of tests performed on P91, P265 and 13 HMF steel samples, and a low cost service life monitoring is proposed (NDT).

Keywords: SHM Structural health monitoring, NDT Non-destructive testing

Skład chemiczny – ciąg dalszy					
S	Cu	Cr	Ni	Mo	inne
max 0,040	max 0,25	0,30 0,60	max 0,30	0,50 0,65	Al max 0,02

Stal 20H12M1F (X20CrMoV12-1 DIN) była stosowana na wyposażenie energetyczne pracujące w temperaturach do 600°C [2]. Gatunek ten lub jego odpowiednik jest stosowany na pręty okrągłownicowe, odkuwki, pręty okrągłe i płaskowniki.

Gatunek stali	Standard	Skład chemiczny			
		C	Mn	Si	P
20H12M1F	PN	0,17	0,30	0,10	max
		0,23	0,80	0,50	0,035

Skład chemiczny - ciąg dalszy					
S	Cu	Cr	Ni	Mo	inne
max	-	0,70	11,00	0,30	v 0,25
0,035	-	1,00	12,00	0,80	0,035

Powyższe gatunki stali stanowiły podstawę powojennej energetyki, opartej głównie na normach GOST. Stal P91 (XCrMoVNb9-1 DIN) jest szczególnie odpowiednia na kotły parowe, elementy kotłów, walcarki i zbiorniki ciśnieniowe. Może pracować ciągle w temperaturach do około 650°C.

Gatunek stali	Standard	Skład chemiczny			
		C	Mn	Si	P
P91, XCrMo- VNb9-1 W-1.4903	ASME DIN	0,08	0,30	0,20	max
		0,12	0,60	0,50	0,035

Skład chemiczny - ciąg dalszy						
S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	inne
max	8,0	<0,40	0,85	0,18	0,06	N: 0,03
0,035	9,5	<0,40	1,05	0,25	0,1	0,07

Stal P91 wraz z jej poprzedniczką 20H12M1F należą do grupy stali martenzytycznych.

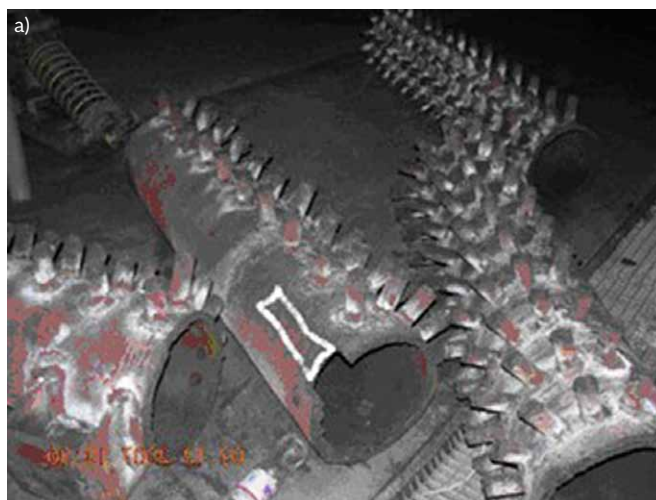
### Przykłady zastosowań

Zamieszczone fotografie ilustrują kolejno: fragmenty komory wlotowej przegrzewacza II stopnia pary wtórnie przegrzanej (M-2) (rys. 1 a), komory wlotowej pary świeżej z III stopnia (rys. 1 b), przegrzewacza pary świeżej i kolana rurociągu pary wtórnie przegrzanej (rys. 1 c).

Eksploatacyjna ewolucja parametrów mechanicznych [2] i magnetycznych jest nieliniowa, ściśle powiązana ze składem chemicznym materiału, strukturą i charakterem obciążeń eksploatacyjnych. Jeden ze sposobów wyznaczania eksploatacyjnej zmienności własności magnetycznych opisano dla kilku gatunków stali. Wpływ charakteru obciążeń eksploatacyjnych na parametry magnetyczne i elektryczne materiału jest zróżnicowany ze względu na skład chemiczny i strukturę pierwotną. Dlatego dla każdego gatunku stali wymagane są niezależne badania.

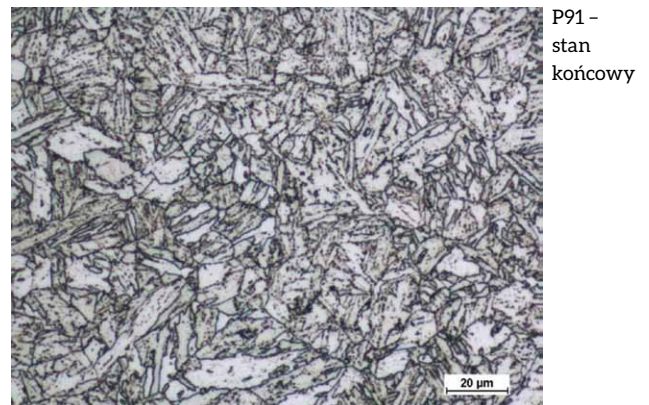
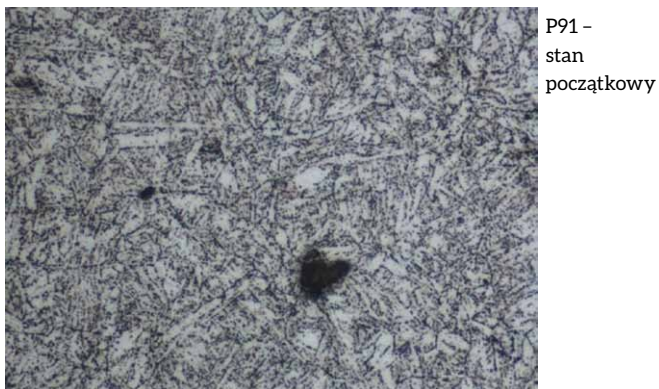
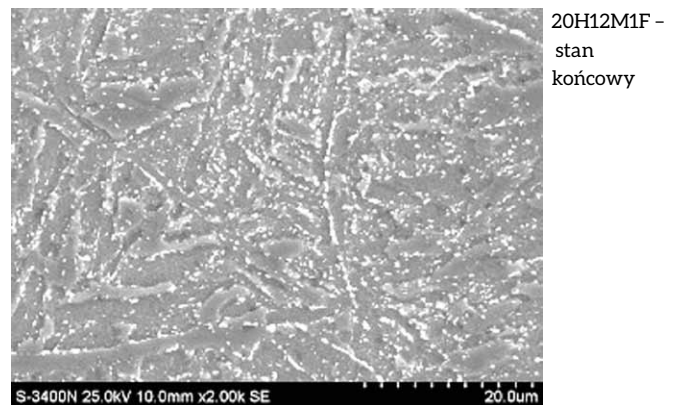
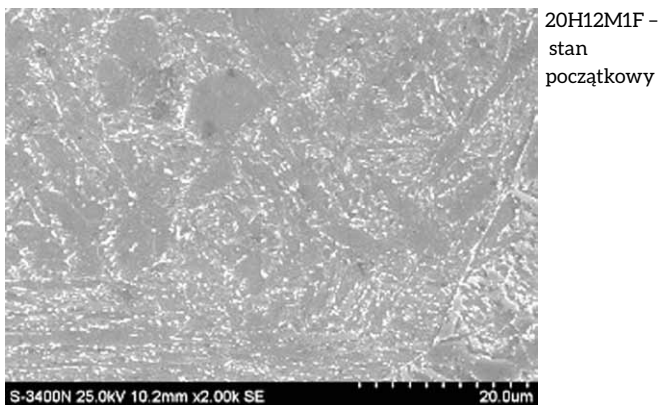
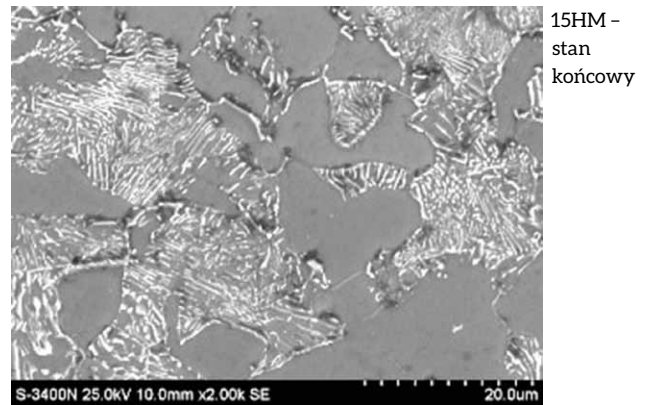
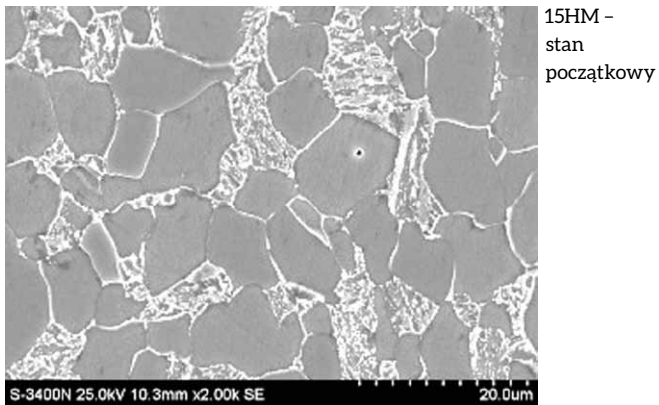
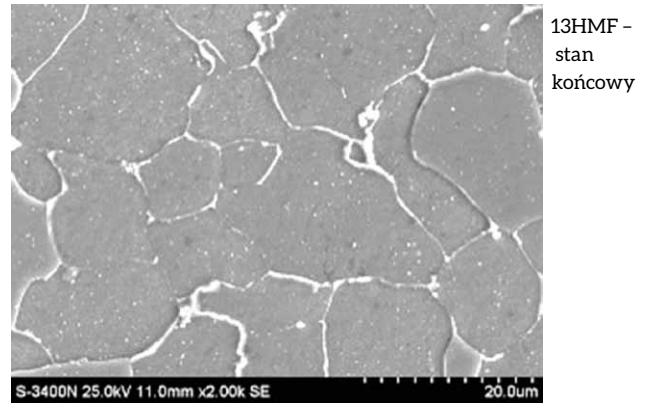
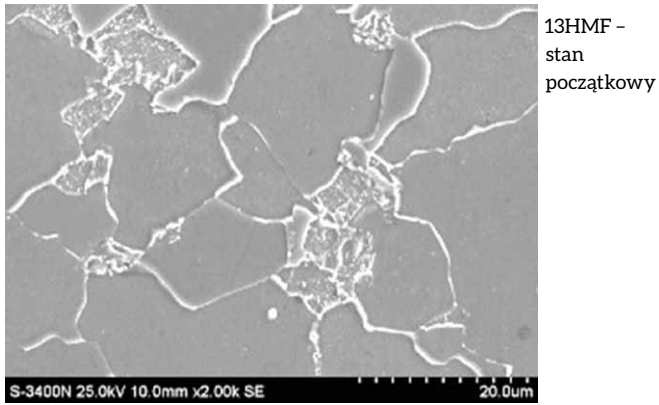
### Ewolucja eksploatacyjna struktury

Porównano materiały wejściowe zgromadzone w magazynach elektrowni (E\*) z materiałami pozyskanymi z remontowanych instalacji wykonanych ze stali: 13HMF, 15HM oraz 20HM12M1F.



Rys. 1. Fragmenty instalacji energetycznych z zaznaczonymi miejscami pobrania próbek, od góry: a - komora wlotowa 15HM; b - komora wlotowa 20H12M1F; c - kolana 13HMF

Badania metalograficzne przeprowadzono przy użyciu mikroskopu skaningowego Hitachi S-4200 sprzężonego z systemem EDS do mikroanalizy rentgenowskiej w Instytucie Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej w ramach grantu własnego. Obserwacje wizualne przy powiększeniach 200, 500,

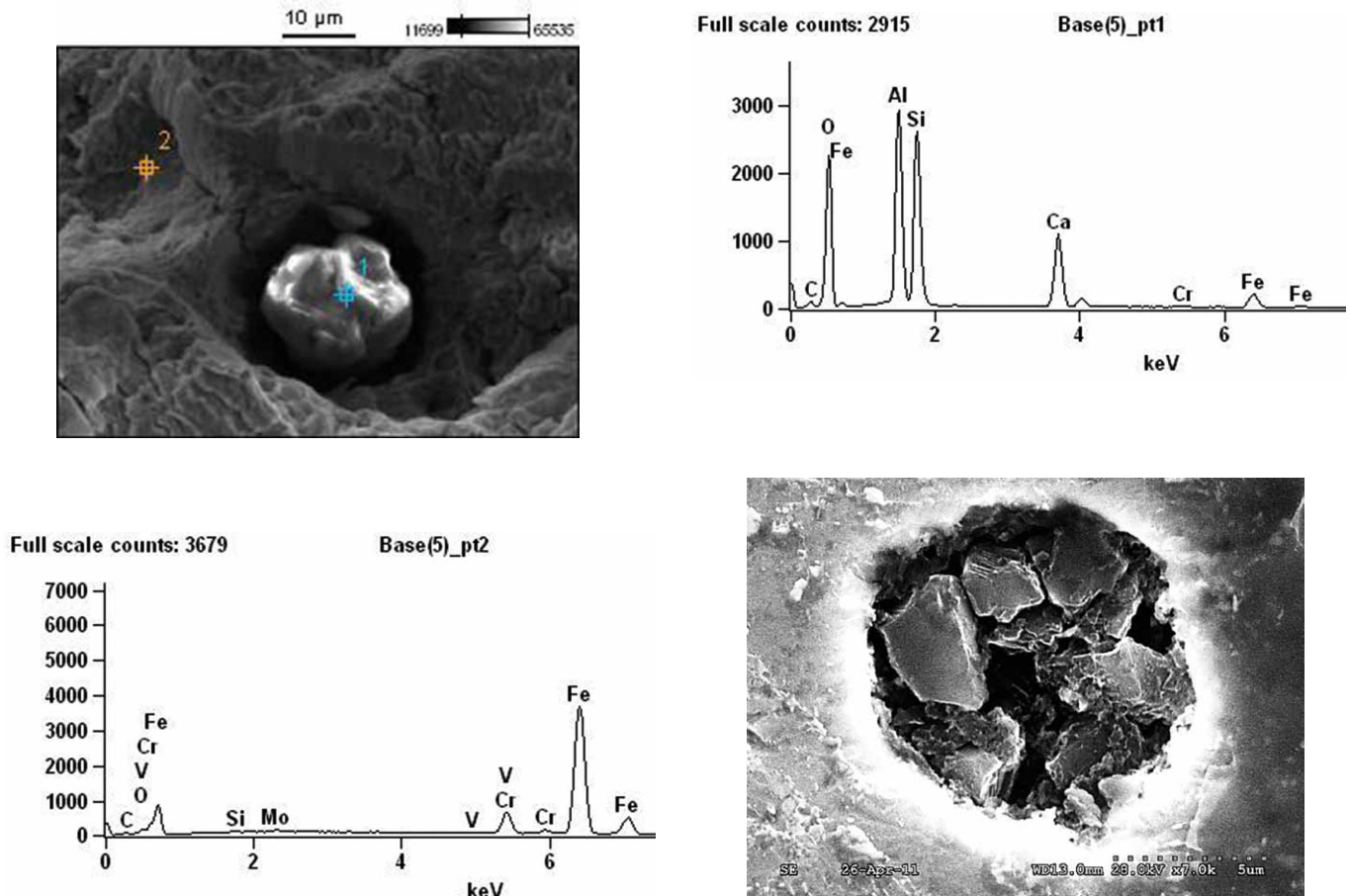


Wizualizacja zmian eksploatacyjnych struktur stali:

- 13HMF stan początkowy - ferryt + perlit
- 15HM stan początkowy - ferryt + perlit
- 20H12M1F stan początkowy - martenzyt

- 13HMF stan końcowy - bainit
- 15HM stan końcowy - ferryt + perlit
- 20H12M1F stan końcowy - martenzyt + węgliki

Rys. 2. Porównanie zmian struktur stali: 13HMF, 15HM, 20H12M1F i P91



Rys. 3. Obrazy i skład wtrąceń niemetalicznych materiału wejściowego, przed i po obciążeniach mechanicznych na stanowisku MTS

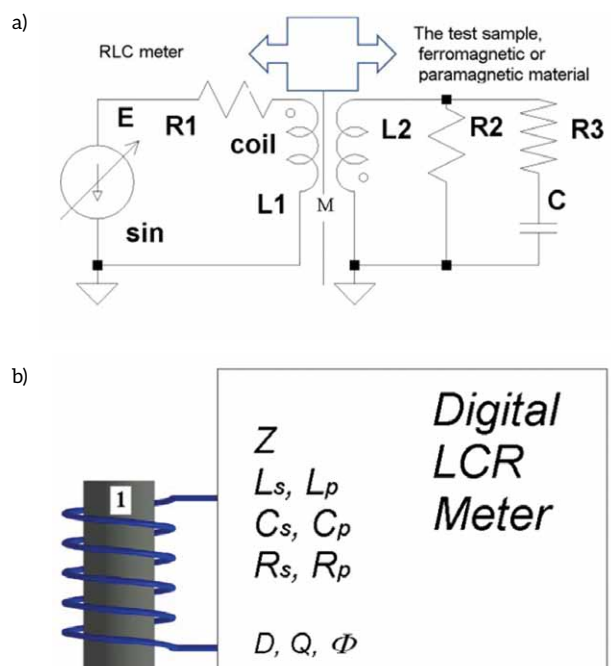
1000 i 2000 prowadzono na całej powierzchni zglądu każdej z próbek [9, 10, 11, 12]. Charakterystyczne elementy struktury ujawnione na każdej z próbek rejestrowano cyfrowo. Wybrane struktury zamieszczono na rysunkach 2 i 3.

W strukturach stali P91, poddanych eksploatacji lub sztucznie starzonych, typową strukturą jest martenzyt odpuszczony z wydzieleniami węglików na granicach pierwotnego austenitu i listwach martenzytu, z ich widocznym wzrostem [2]. W obciążeniach zmęczeniowych cyklicznych dominują degradacje polegające na pękaniu wtrąceń niemetalicznych i propagacji pęknięć na ściany gniazda wtrącenia (rys. 3). Badanie stali energetycznych wymaga prowadzenia badań zmęczeniowych w warunkach eksploatacji lub badań materiałów po eksploatacji na bazie danych wejściowych.

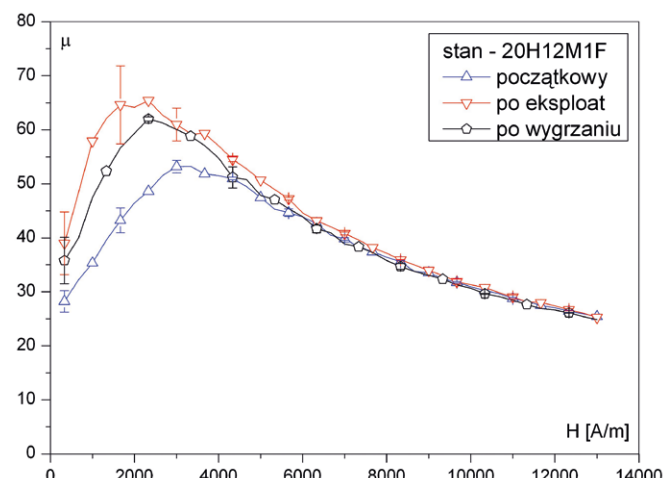
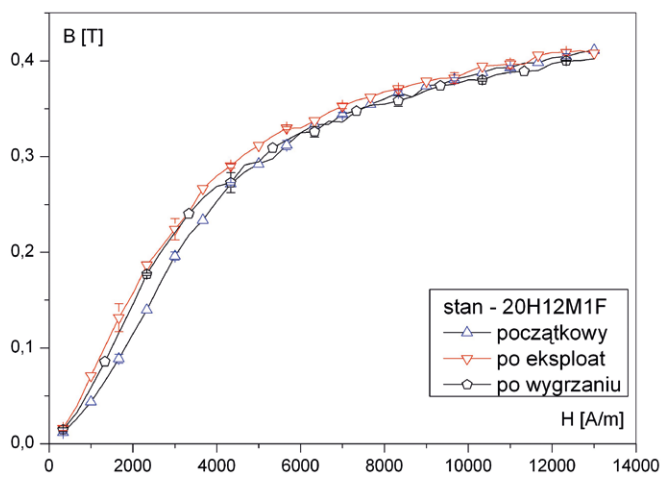
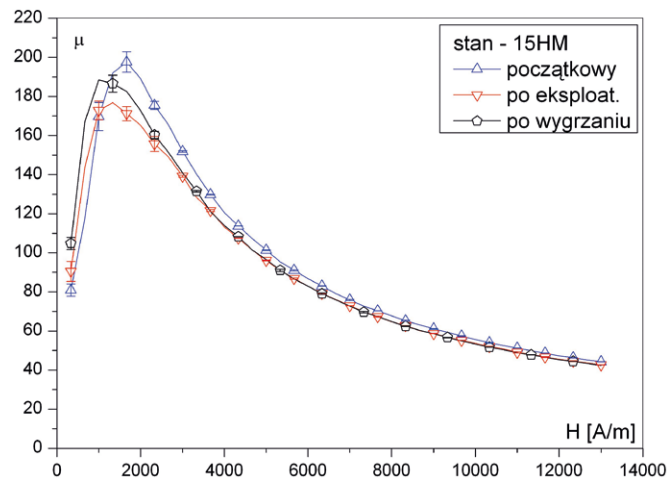
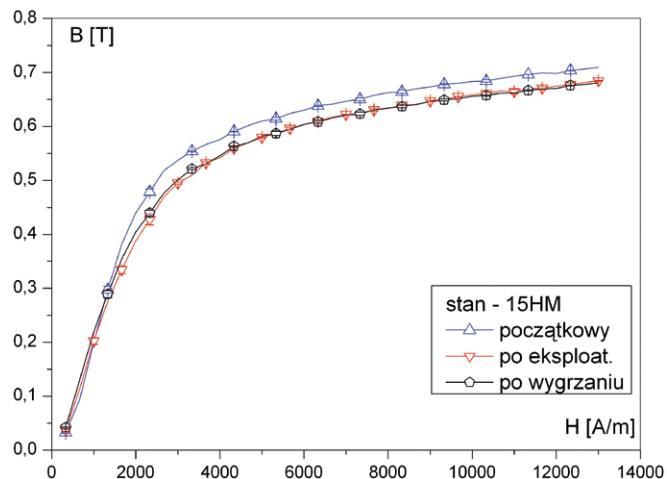
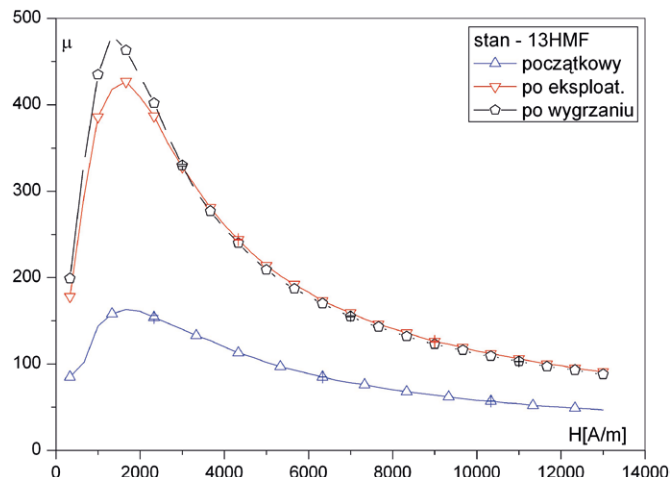
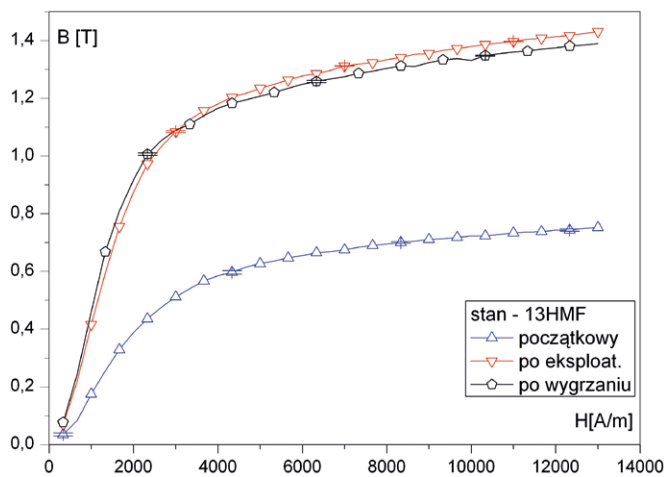
### Pomiary magneto-indukcyjne

Zależności parametryczne materiału można najprościej zobrazować za pomocą modelu. Badany materiał o średnicy  $D_p$  (określony parametrami magnetycznymi i elektrycznymi) [4, 8–13] zmienia parametry elektryczne cewki pomiarowej (o średnicy  $D_c$ ) poprzez sprzężenie indukcyjne  $M$  (rys. 4).

Wybrany został jeden z najprostszych modeli opisanych przez F. Förstera [4], dokonując porównania proporcji unormowanych składowych impedancji [4].



Rys. 4. Model układu pomiarowego [11]: a – schemat elektryczny układu; b – sonda pomiarowa



Rys. 5. Porównanie zmian parametrów eksploatacyjnych stali

$$\frac{\omega L_p}{\omega L_0} \quad \text{i} \quad \frac{R_p - R_0}{\omega L_0} \quad (1)$$

W ten sposób uzyskano informację o wpływie procesu eksploatacyjnego na zmiany i defekty struktur. Mierząc składowe impedancji  $L_s$  i  $R_s$  układu pomiarowego (szeregowego) lub  $L_p$  i  $R_p$  (równoległego), otrzymujemy informacje o trendzie zmian przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej.

Przy porównywaniu wyników pomiaru próbek materiału, ważne jest zachowanie geometrii próbki [4, 9, 11] (promienia próbki  $r_0$ ) oraz geometrii cewki pomiarowej, ze względu na istotny wpływ współczynnika wypełnienia  $\eta$ :

$$\eta = \left( \frac{D_p}{D_c} \right)^2, \quad k = \text{Sqrt}(-i \times \omega \times \gamma \times \mu_r \times \mu_0) \quad (2)$$

$$\mu_{sk} = \frac{2}{k \times r_0} \times \frac{J_1(k \times r_0)}{J_0(k \times r_0)} \quad (3)$$

$$\frac{\omega L}{\omega L_0} [\gamma \rightarrow, \mu_{re} \rightarrow, \omega \rightarrow, \eta] = 1 - \eta + \eta \mu_{re} \text{Re}[\mu_{sk}] \quad (4)$$

$$\frac{R - R_0}{\omega L_0} [\gamma \rightarrow, \mu_{re} \rightarrow, \omega \rightarrow, \eta] = -\eta \mu_{re} \text{Im}[\mu_{sk}] \quad (5)$$

Częstotliwość graniczna definiowana jest zależnością:

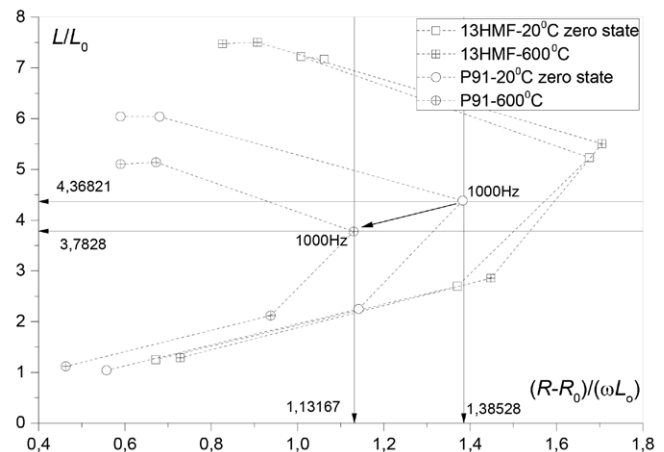
$$f_g = 2 / (\pi \times D_p^2 \times \gamma \times \mu_o \times \mu_r) \quad (6)$$

Wartość ta charakteryzuje wnikanie prądów wirowych i pola magnetycznego w głąb próbki cylindrycznej. Zależności te przedstawiają wzory [4, 11, 12] i pamiętać musimy o współczynniku odmagnesowania i wypełnienia próbki materiałem. Analiza konstrukcji cewek i wymiarów próbek przeprowadzona w programie Matematyka [9] upewnia, że względne zmiany dla (przyjętego standardu) są wystarczające dla diagnostyki stanu.

### Ewolucja eksploatacyjna parametrów magnetycznych

Znaczące zmiany indukcyjności cewki pomiarowej z próbką po eksploatacji zaobserwowano dla stali 13HMF oraz 20H12M1F. W stali 15HM wykryte zmiany obserwowano jedynie dla maksymalnej przenikalności dynamicznej. Przebiegi krzywych pierwszego magnesowania oraz przenikalności magnetycznej dynamicznej, dla materiału początkowego i po eksploatacji oraz materiału wygrzewanego w celu eliminacji naprężeń drugiego rodzaju [9, 10], zamieszczono na rysunku 5.

Każdy z gatunków stali wykazuje zmiany eksploatacyjne parametrów. Dla zakresu natężenia pola do 200 A/m, wartości odchyłek standardowych potwierdzają możliwość zastosowania pomiarów magnetycznych jako obserwatora stanu wyeksploatowania.



Rys. 6. Porównanie zmian unormowanych składowych impedancji dla dwóch gatunków stali stosowanych w energetyce

### Pomiary parametrów magnetycznych stali P91 mostkiem RLC

Stal 20H12M1F stanowiła bazę doświadczalno-pomiarową [9, 11]. Dla stali P91 nie dysponowano stalą wyeksploatowaną w warunkach przemysłowych. Pomiary przeprowadzono na próbkach magazynowych stali P91 oraz na próbkach wyżarzanych. Porównano materiał w stanie początkowym i po wyżarzeniu w temperaturze 600°C. Wykres zmian unormowanych składowych impedancji dla pięciu podstawowych zakresów częstotliwości mostka RLC (100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz) [11] jest pokazany na rysunku 6.

Porównywalne zmiany materiału w stosunku do cyklu eksploatacyjnego stanowi wyżarzanie w czasie 80 do 100 tysięcy godzin, w temperaturze 600°C. Rzeczywiste zmiany skutecznej przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej mogą być wyprowadzone numerycznie ze względnych zmian unormowanych składowych impedancji pokazanych na rysunku 6. Znaczne zmiany tych parametrów dla stali P91 następują wraz ze znaczącymi zmianami parametrów mechanicznych [2].

### Przykładowe rozwiązanie konstrukcyjne monitoringu diagnostycznego

Zmiana parametrów elektrycznych obejmuje także zmianę wartości częstotliwości rezonansu układu pomiarowego [5, 9, 10, 11]. Obecność ciała ferromagnetycznego w pobliżu przewodów testujących powoduje, że obwody pomiarowe także stają się nieliniowe (rys. 7) pod wpływem aktualnej dla pomiaru krzywej  $B_{(H)}$  materiału.

Reakcja przewodu na materiał ferromagnetyczny umiejscawia powyższe zagadnienie w kręgu metod diagnostyki nieniszczącej SHM, NDT [3, 4, 5, 7]. Poprzez sprzężenie indukcyjne jednoprzewodowego kabla pomiarowego można kontrolować parametry odcinka rurociągu, nawet w temperaturze pracy. Jeśli sonda przewodowa jest wyposażona w osłonę silikonową, temperatura rurociągu jest mniej destrukcyjna dla przewodu niż w przypadku wyszukanych technologicznie tensometrów.



Rys. 7. Przykład zastosowania przetworników LDC w kontroli eksploatacyjnej rurociągu

W skali laboratoryjnej rozpoczęto testowanie metody wycinka instalacji centralnego ogrzewania CO.

Przetwornik przedstawiony na schemacie (rys. 7) rejestruje zmiany częstotliwości indukcyjnego sprzężenia rezonansowego będącego podstawą dla diagnostyki.


### Wnioski i kierunki dalszych badań

Spektroskopia impedancji, unormowane składowe impedancji i rezonans magnetyczny są potencjalnymi urządzeniami diagnostycznymi i metodami stanu degradacji materiału. Kolejną przewagą proponowanych metod jest niski koszt aparatury bez utraty powtarzalności i czułości detekcji. Proste metody diagnostyczne [8–12] nie muszą być zagrożeniem dla koncernów produkujących urządzenia defektoskopowe, mogą służyć modyfikacji klasycznych metod detekcji pęknięć. Proponowana metoda spotkała się z zainteresowaniem w kilku ośrodkach akademickich w kraju, pierwsze aplikacje przemysłowe zostały przetestowane. Dostępne na rynku moduły pomiarowe firmy TI [13] są dobrym krokiem w kierunku dalszej miniaturyzacji i obniżki kosztów, przy zapewnionym standardzie metrologicznym oraz obniżeniu kosztów dla celów dydaktycznych w instytutach materiałowych. Powyższy temat przedstawiano na Światowym Kongresie Badań Nieniszczących WCNDT Munch 2016. Współautorzy artykułu byli uczestnikami tego Kongresu. Tylko dwie osoby z naszego Kraju uczestniczyły w składzie Komitetu Naukowego Kongresu, o czym warto wiedzieć.

### Literatura

- [1] DOBMANN G., ALTPETER I., SZIELASKO K., KOPP M.: *Nondestructive damage characterization with examples of thermal aging, neutron degradation and fatigue*. „Journal of Theoretical and Applied Mechanics” 44(3)/2006.
- [2] DOBRZAŃSKI J.: *Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki*. Open Access Library, 2011, t. 3, s. 1–228.

- [3] Eddy Current Testing at Level 2: Manual for the Syllabi Contained in IAEA-TECDOC-628. Rev. 2, „Training Guidelines for Non Destructive Testing Techniques”, Printed by the IAEA in Austria February 2011.
- [4] HEPTNER H., STROPPE H.: *Magnetische und Magneto Induktive Werkstoffprüfung Deutsche Verlag für Grundstoffindustrie*. Leipzig 1962, VLN 152-915/34/69.
- [5] HUGHES R., FAN Y., DIXON S.: *Near electrical resonance signal enhancement (NERSE) in eddy-current crack detection*, NDT&E International, 66/2014, pp. 82–89.
- [6] Ugitech, Magnetism and Stainless steel.
- [7] WENQIAN Z.: *Electromagnetic Techniques for On-line Inspection of Steel Microstructure*, A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences 2013.
- [8] ŻUREK Z.H., WITOŚ M.: *Diagnostics of degradative changes in paramagnetic alloys with the use of low frequency impedance spectroscopy*, 7th International Symposium on NDT in Aerospace, 16–18 November 2015, Bremen, Germany, SHMndt-e.
- [9] ŻUREK Z.H., DUKA P.: *RLC circuits for material testing and NDT*, Institute of Electrical Drives and Machines KOMEL, Katowice 2015, PL ISBN 978-83-931909-8-0, KOMELbook.
- [10] ŻUREK Z.H.: Projekt badawczy NN5102383 38, Metoda diagnostyki stanu stalowych (paramagnetycznych i ferromagnetycznych) elementów maszyn elektrycznych na przykładzie bandaży i kap wirników generatorów.
- [11] ŻUREK Z.H.: *Wprowadzenie do elektromagnetycznej diagnostyki degradacji stali*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2012, 155 pp., MONOGRAFIA; No 423, monZHZ.
- [12] [https://www.researchgate.net/profile/Zbigniew\\_Zurek3](https://www.researchgate.net/profile/Zbigniew_Zurek3)
- [13] <http://www.ti.com/tool/LDC1000EVM>

 Zbigniew Hilary Żurek – Politechnika Śląska, Katowice,  
e-mail: zbigniew.zurek@polsl.pl;  
Gerd Dobmann – Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Germany,  
e-mail: gerd.dobmann@t-online.de;  
Bernd Rockstroh – GMH Prüftechnik GmbH, Nürnberg, Germany,  
e-mail: b.rockstroh@t-online.de;  
Dominik Kukla – IPPT, PAN, Warszawa,  
e-mail: dkukla@ippt.pan.pl